doi:10.13866/j.azr.2018.06.24

折力损伤自修复对干旱矿区小叶锦鸡儿根系固土的影响①

王 博[1], 刘 静[1], 王晨嘉[1], 张 欣[2], 李 强[3], 刘嘉伟[1], 张 强[1]

(1. 内蒙古农业大学沙漠治理学院,内蒙古 呼和浩特 010019; 2. 水利部牧区水利科学研究所,内蒙古 呼和浩特 010019; 3. 神东煤炭集团环保管理处,内蒙古 伊金霍洛旗 017200)

摘 要: 为明确干旱矿区侵蚀发生后折力损伤对植物根系力学特性的影响及其受损后的自修复机制,利用 HG100 数显式推拉力计和自制便携式试验机台,对小叶锦鸡儿 1 ~4 mm 径级直根和侧根分支处未受损及受损自修复后的抗折力学特性进行研究。结果表明:① 生长季初期,未受损小叶锦鸡儿根系极限抗折力与根径呈幂函数正相关,抗折强度与根径幂函数负相关,直根极限抗折力和抗折强度均大于侧根分支处;② 折力损伤会明显抑制根系正常生长,小叶锦鸡儿根系受损自修复后,活性、生长量和保存率均低于平行对照,根径和根型均是影响这种抑制作用的重要因素,侧根分支处活性和保存率在受损后的减少程度显著大于直根;③ 小叶锦鸡儿根系受损自修复后,极限抗折力与抗折强度相比,生长季初期有所增加,但外力损伤会显著阻碍这种增长,导致其增长率显著低于平行对照,3 个月后极限抗折力修复率为 48.91%,抗折强度修复率为 57.59%,说明根系受损后不会彻底丧失固土能力,通过自修复可以逐步恢复原有功能,但短期内自修复程度有限。直根极限抗折力修复率为 60.55%,侧根分支处仅为 36.34%,说明在同等外力荷载条件下,小叶锦鸡儿直根受损自修复能力显著大于侧根分支处,具备更强的再次抵御外力破坏的能力。

关键词: 采煤沉陷区; 抗折特性; 小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*); 根系受损; 自修复

干旱、半干旱矿区由于工矿业活动,每年造成极大的生态价值损失[1],采煤诱发地面沉陷和地裂缝等土壤侵蚀,导致土壤持水力下降[2],风蚀、水蚀产生土壤养分流失[3],这些侵蚀营力共同作用加速了侵蚀区内土体结构破坏,土壤性质改变和水分条件丧失形成严重的水土流失,抑制植被及土壤微生物生长[4]。根系作为植物与土壤环境进行物质交换和能量传递的重要器官[5],交叉缠绕的根网可以有效抵御侵蚀和防止水土流失的作用[6]。但在抵抗外力破坏的同时,侵蚀营力直接作用会对根系本身产生破坏性损伤,在沉陷裂缝区域内根系承受拉拔、剪切等外力荷载[7],导致根系发生断裂、皮裂或扭曲变形[8],严重者可导致根系退化和死亡。但是,作为生态系统中的生命组分,植物根系组织和细胞具有活跃的愈伤能力,可以在一定程度上恢复外力侵蚀对植物体造成的损伤,维护矿区植物群落稳定生长并发挥正常生态功能[9]。本课题组将这种根系特有受力受损—愈伤—再次受力的可持续固土功能,定义为根系自修复特性。这种自修复能力决定了植物在受损后地上枝叶的生长状态和地下根系可持续固土抗蚀的潜力,对于大面积采煤沉陷区水土流失防治和生态恢复至关重要,既能促进因种子蓄库偏低导致自然更新缓慢的受损生态系统正向演替[10],又可兼顾一次建设、持续保护的经济有效原则[11]。目前,对于矿区植物根系研究多集中于根系损伤机理[3,7]、人工接种菌根真菌促进植物根系生长[12]、地裂缝对根际微环境影响[13]等方面,对于根系受力受损后力学特性自修复的研究尚未开展。本研究以小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)根系为研究对象,在不离体条件下对根系施加损伤力,探讨根系受力受损后的自修复特性,以及自修复过程中根系抗折力学特性的变化,研究在半干旱矿区地裂缝的破坏作用下,灌木根系的可持续固土抗蚀机制,为矿区生态修复提供科学依据。

---

① 收稿日期: 2018-04-13; 修订日期: 2018-05-17
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51364034); 内蒙古自治区研究生科研创新资助项目(B20171012907Z)
作者简介: 王博(1989-),男,博士研究生,主要从事矿区水土流失防治和生态恢复. E-mail: wbbrave@163.com
通讯作者: 刘静. E-mail: Ljing58@126.com

1 材料和方法

1.1 研究区概况

试验区位于陕西省榆林市神木县大柳塔镇,地处毛乌素沙漠与黄土丘陵区的过渡地带,南部具有典型的黄土丘陵地貌特征,北部则具有明显的风沙地貌特征。属于大陆性干旱半干旱气候,春冬季多风干燥,夏秋季降雨集中。年平均气温 8.9 ℃,年平均降水量 396.8 mm,年平均蒸发量 1 790.4 mm。成土母质主要有风积沙、冲积物和洪积物,土壤粒径主要以砂砾为主,土壤结构较差且缺少有机质,通气性强,保水保肥效果差。主要植物种有小叶锦鸡儿、北沙柳(*Salix Psammophita*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、黑沙蒿(*Artemisia ordosica*)、爬地柏(*Sabina procumbens*)、沙竹(*Phyllostachys propinqua*)、长芒草(*Stipa bungeana*)等。

1.2 试验设计

试验地为采煤沉陷后的生态治理区,恢复期 15 a左右。试验区内植被为同年飞播,同种植物生长状况相似,随机选取长势良好的小叶锦鸡儿测量每株地径、冠幅、株高,计算各指标的平均值并依此判定标准株〔株高(0.69 ±0.08)m,冠幅(0.87 ±0.13)m^2,基径(1.42 ±0.27)cm〕,最终选取与标准株形态指标相近的小叶锦鸡儿 25 株作为试验样木。

本试验为野外原位试验,于 2016 年 5 月,即生长季初期对所选样木根系进行挖掘,供试根选择径级在 1 ~4 mm 的直根和侧根分支处。直根试验段长度 >6 cm,侧根分支处要求沿上级直根的轴向总长 >6 cm。在同一植株上选择与试验根直径相同的直根及侧根分支处作为对照,对照根长度 >6 cm。挖出根系分 3 组进行不离体试验,A 组进行生长季初期未受损根系的极限抗折力测定,两种根型各径级需 10 根重复;B 组进行损伤折力试验,为模拟自然环境中根系的受力受损状态,人为对不同根型、不同径级根系施加损伤折力,施力强度为 A 组测得各径级根系极限抗折力的 50%(研究表明,1 ~4 mm 径级范围内小叶锦鸡儿根系弹性极限点为 15% ~20%,超过极限点后根系产生塑性损伤),各径级需 30 根重复。施力时喷水以保证根系不失水并保证表皮完好无损,施力后对根系进行细铁丝牵引标记,原状土填埋开始受损自修复,修复时长设定为 3 个月。C 组为不施加任何损伤力的对照根系,仅保持与前 2 组相同扰动水平(挖掘、暴露、填埋),以下简称平行对照,各径级需 30 根重复。填埋后自然生长时长同样设定为 3 个月。于生长旺盛期(8 月)将 B 组和 C 组根系挖出,并分别测定各径级直根和侧根分支处活性、根径生长量、保存率、极限抗折力。

1.3 指标测定及方法

1.3.1 根径测定 如图 1a 所示,直根测量其中点 O 以及距中点 30 mm 的两点 a、b 的直径,每个点的直径采用十字交叉法测量 2 次,取 3 点平均值作为直根的平均根径,阴影部分为夹具夹持部分;图 1b 所示侧根分支处根径,采用游标卡尺每隔 120°测量侧根分支处 O 点的直径,并采用十字交叉法测取上级直根 a 点和两条侧根 b、b′点的直径。取 4 点直径的平均值作为侧根分支处的根径,阴影部分为夹具夹持部分。

1.3.2 极限抗折力测定 如图 2a 所示,当地裂缝出现后,土体沿 αβ 面发生错动沉陷,水平穿插于土层中的根系会随着土层位移并受力变形。在垂直向

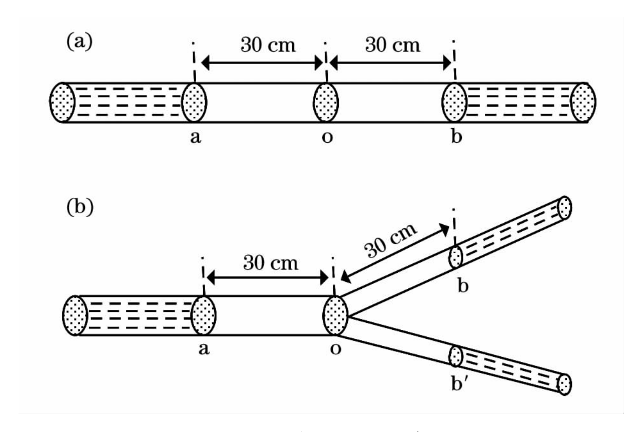


图 1 试验根根型示意图

Fig. 1 The schematic diagram of test root types

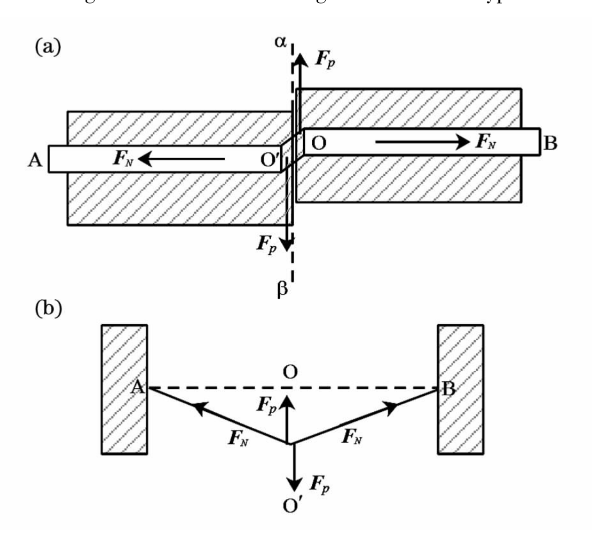


图 2 试验根径向折力分析图

Fig. 2 Analysis diagram of root radial fracture force

下的外力作用下,根系横截面 O 沿该外力方向发生相对错动变形而承受剪切力 F_p,同时根系是具备一定弹性模量的活性材料,横截面受力后将延展拉伸并将拉力 F_N 传递到 A、B 端,使水平根系承受拉力。因此,在土体沉陷时,根系横截面 O 点同时承受轴向拉力和径向剪力。在本实验中,为了模拟根系的这种复合受力状态,更真实的还原根系在土体错动时的受力状况(图 2b),将这种复合受力概化为径向折力。采用 HG100 数显式推拉力计(精度 0.05 N)以及自制便携式试验机台(实用新型专利 2016 20176558.X)进行折力测定,加载速度设定为 50 $mm \cdot min^{-1}$,试验将试验根断裂(侧根分支处以 O 点断裂为准)作为测定的终点。极限抗折强度计算公式为:

$$\sigma = 4F/\pi D^2$$

式中:σ 为极限抗折强度(MPa);F 为极限抗折力(N);D 为根径(mm)。

1.3.3　根系保存率　根据根系外形、颜色、弹性及根皮与中柱分离的难易程度来区分活根、死根。保存率计算公式为:

保存率 = 活根数/试验根数 × 100%

1.3.4　根系活性测定　根系活性采用 TTC 染色,通过 UV759 紫外分光光度计测定,活力值用 TTC 还原强度($\mu g \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$)表示。

1.3.5　修复率　根系受力受损自修复程度的评价指标,以同时期平行对照根系极限抗折力/强度的增长率为基准进行计算:

修复率 = 自修复增长率/平行对照增长率 × 100%

1.4　数据分析

试验数据处理及作图采用 Excel 及 Sigmaplot 12.5 软件进行,并采用 SPSS 20.0 软件进行统计检验,选取单因子方差分析(one-way ANOVA)和最小显著极差法(LSD)对自修复力学特性的差异性进行分析($\alpha = 0.05$),使用 Pearson 检验对根系自修复后生长特性与力学特性进行相关性分析。

2　结果与分析

2.1　未受损根系极限抗折力和抗折强度

灌木根系极限抗折力和抗折强度决定了根系所能承受的最大外力荷载,是根系固土抗蚀能力的直接体现。于生长季初期对未受损根系进行极限力学试验(图 3),小叶锦鸡儿直根和侧根分支处的极限抗折力均随根径的增大而增强,抗折强度随根径的增大而减弱,各径级极限抗折力和抗折强度差异显著($P < 0.05$)。就根型而言,直根极限抗折力和抗折强度均显著大于侧根分支处,两种根型极限抗折力和抗折强度存在显著差异($P < 0.05$)。其中,侧根分支处极限抗折力为直根的 73.23%,而极限抗折强度相比直根减小 24.88%。以上结果表明,在微生境相同的条件下,因植物自身的遗传特性和生理指标不同,根径、根型都是影响根系极限抗折力的主要因素。侧根分支处因分叉结构稳定性较差,容易出现撕裂破坏,使其对外力荷载的耐受性变弱,成为根系网络的易损部位。

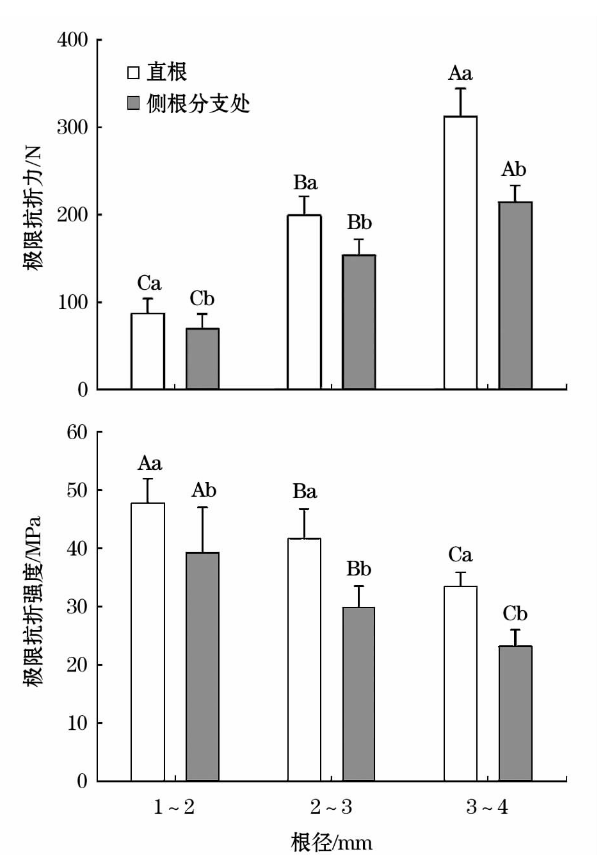


图 3　根系极限抗折力和抗折强度

Fig. 3　Ultimate anti-fracture force and strength of roots

2.2　受损自修复对根系活性的影响

根系是活跃的吸收器官和合成器官,根系的活力水平直接影响植物地上部分生长和地下根系的延伸,也是组织和细胞自修复的重要影响因素之一。如图 4 所示,根系在遭受外力荷载后细胞和组织会出现一定程度的损伤,导致活力值明显降低,即使通过 3 个月的自修复,活力值仍然低于平行对照根系,

1～4 mm 受损自修复后的活性相比平行对照根系平均降低 11.87%，二者之间存在显著差异（$P<0.05$）。无论受损与否，小叶锦鸡儿根系的活力值基本表现出随根径的增长而逐步减弱的趋势，其中直根活力最大值出现在 2～2.5 mm 径级范围内，而侧根分支处的活性则以 1～1.5 mm 径级最强。根型不同活性也有所差异，侧根分支处活性显著低于直根，其中平行对照侧根分支处活性为直根的 91.48%，而受损自修复后侧根分支处的活性仅为直根的 84.74%。

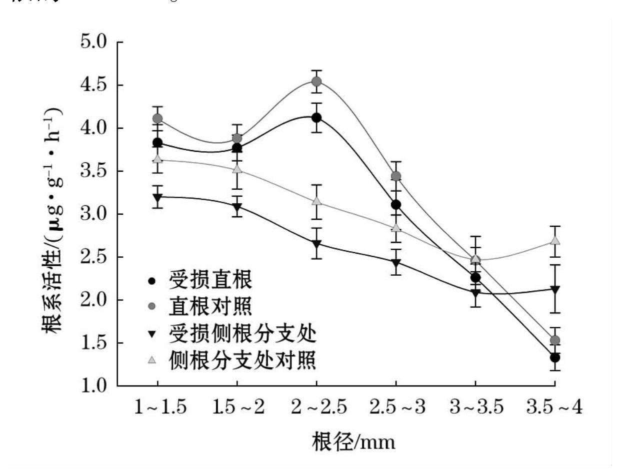


图 4　受损自修复后根系活性的变化

Fig. 4　Change of root activity after self-healing

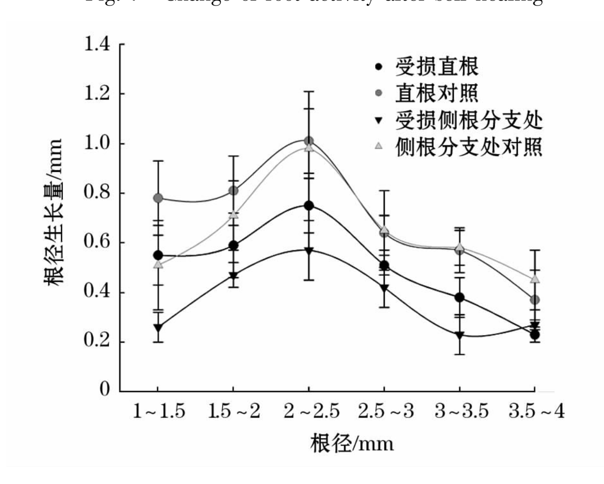


图 5　受损自修复后根径生长量的变化

Fig. 5　Change of root diameter increment after self-healing

2.3　受损自修复对根径生长量的影响

采空区沉陷及地裂缝发育等侵蚀营力会破坏根际微环境和根系组织结构，进而形成对植物根系正常生长发育的抑制作用。如图 5 所示，通过 3 个月的自修复，1～4 mm 受损根系依然能够保持继续生长，但是生长量显著低于平行对照异（$P<0.05$），前者根径生长量平均仅为后者的 63.53%，说明外力损伤对根系生长的阻碍作用十分显著，生长速率明显减缓。受损的直根和侧根分支处修复后根径均有所增长，前者生长量大于后者，但不存在显著差异（$P=0.101$）。两种根型根径生长量随根径呈单峰曲线波动，在 2～2.5 mm 径级范围内增长最大。

2.4　受损自修复对根系保存率的影响

植物地下根系数量、生物量、体积等是直接反应其固土能力的形态学指标，根系受损自修复后的活性根系数量越多，保存率越大，则越有利于植物长效固土的实现。如图 6 所示，小叶锦鸡儿根系在受损自修复过程中，根系出现死亡，修复生长后，1～4 mm 受损根系保存率相比平行对照根系显著降低 16.83%（$P<0.05$）。不同根型保存率差异明显，侧根分支处的保存率明显低于直根，前者较后者减小了 9.24%，这是因为侧根分支处的分支节点在受力后容易撕裂破坏，产生不可修复的损伤，因此，侧根分支处在受损后更容易出现死亡的现象。不同根径保存率亦有所差异，两种根型受损自修复后的保存率均随根径增大逐渐降低。

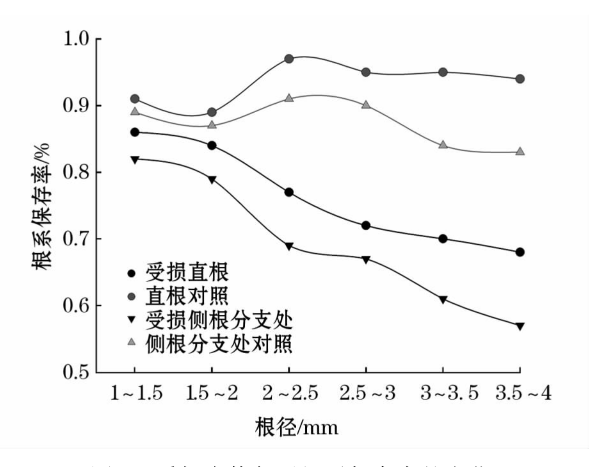


图 6　受损自修复后根系保存率的变化

Fig. 6　Change of root survival rate after self-healing

2.5　受损自修复对根系极限抗折力学特性的影响

试验表明，小叶锦鸡儿受损自修复后，根系极限抗折力与平行对照差异显著（$P<0.05$）。平行对照在生长过程中随根径增长极限抗折力不断增加，受损根系因外力作用导致组织结构破坏，虽然在自修复作用下极限抗折力有所增长，但仍不能恢复到未受损的平行对照根系水平。图 3 和图 7 所示，1～4 mm 受损根系自修复后相比生长季初期极限抗折力平均增长了 22.73%，极限抗折强度增长 17.27%；而平行对照极限抗折力显著增长了 37.75%，抗折强度增长 29.57%。自修复 3 个月后，小叶锦鸡儿

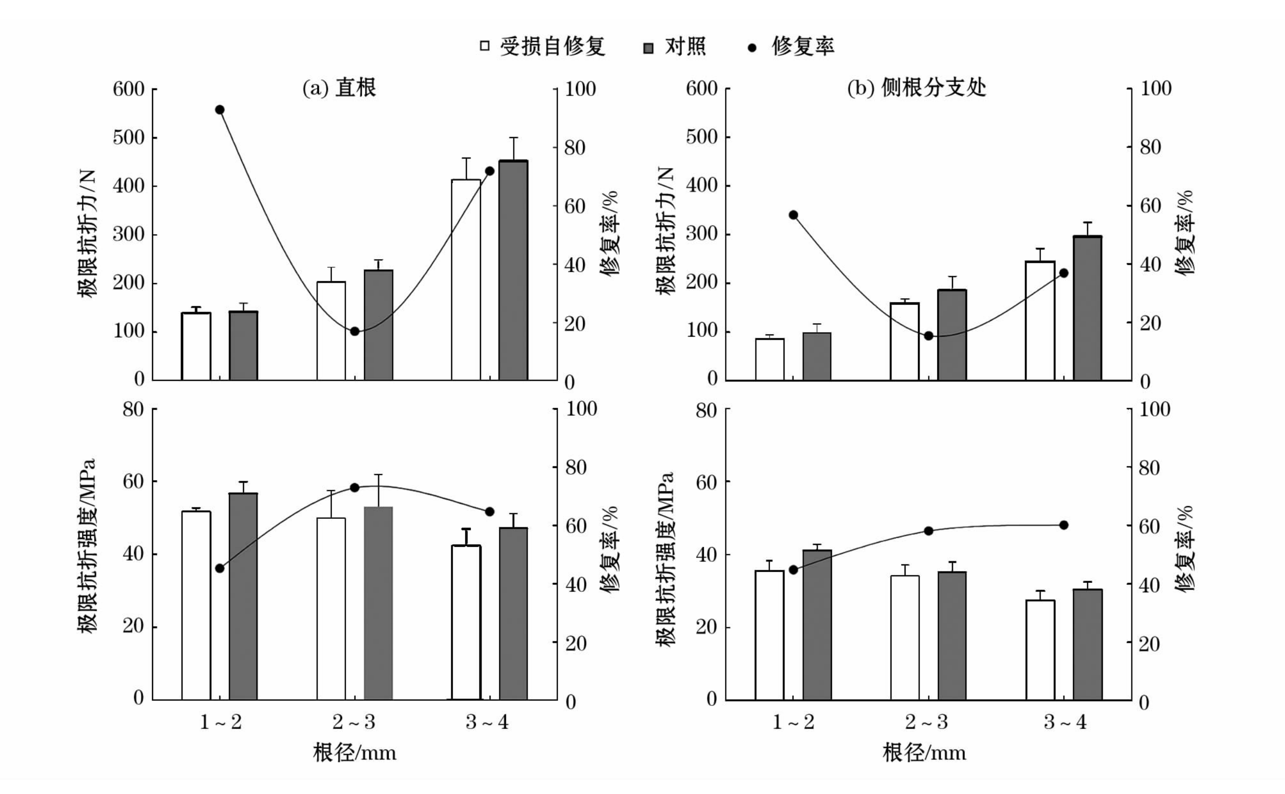


图 7　受损自修复后根系极限抗折力学特性的变化

Fig. 7　Change of ultimate anti-fracture mechanical properties of roots after self-healing

表 1　根系受损自修复后生长特性与抗折力学特性相关系数矩阵

Tab. 1　Correlation coefficient matrix of growth and anti-fracture mechanical properties of roots after self-healing

根型	力学特性	折力损伤自修复			未受损自然生长		
		根系活性	根径生长量	根系保存率	根系活性	根径生长量	根系保存率
直根	极限抗折力	-0.953**	-0.872**	-0.854**	-0.934**	-0.821**	0.602
	极限抗折强度	0.798**	0.719*	0.663	0.705*	0.743*	-0.710*
侧根分支处	极限抗折力	-0.938**	-0.433	-0.961**	-0.935**	-0.251	-0.829**
	极限抗折强度	0.916**	0.533	0.953**	0.947**	0.242	0.765*

注:**在 0.01 水平上显著相关,*在 0.05 水平上显著相关。

根系极限抗折力平均修复率为 48.91%,极限抗折强度平均修复率为 57.59%。直根受损自修复后极限抗折力增长率和修复率均显著大于侧根分支处,前者极限抗折力增长率和修复率分别为 31.74% 和 60.55%,后者仅为 13.69% 和 36.34%;极限抗折强度也表现出同样的规律,直根增长率和修复率分别为 18.41% 和 60.88%,侧根分支处分别为 16.12% 和 54.29%。这充分说明在同等外力荷载条件下,小叶锦鸡儿直根受损自修复的能力明显大于侧根分支处,自修复后具备更强的再次抵御外力破坏的能力。根径不同修复率同样存在差异,极限抗折力修复率随根径增加呈下凹型曲线,在 2~3 mm 根径范围内修复率最低。

由表 1 可知,小叶锦鸡儿直根受损自修复后,极限抗折力与根系活性、根径生长量和根系保存率极显著负相关($P\leqslant0.01$),极限抗折强度与根系活性、根径生长量极显著和显著正相关($P\leqslant0.05$),与根系保存率无相关关系;侧根分支处受损自修复后的极限抗折力与根系活性及根系保存率极显著负相关,极限抗折强度与根系活性和根系保存率极显著正相关,与根系生长量无显著的相关关系。平行对照根系极限抗折力与抗折强度均与活性、生长量、保存率存在显著或极显著的相关关系。由此可知,根系的生物学特性(活性、生长量、保存率)能够显著影响根系的径向抗折力学特性,同时也是根系抗折力学特性受损后进行自我修复的重要因素。

3 讨 论

折力损伤是拉伸和剪切破坏的复合形式，折断点受剪，断点两端受拉，能够较真实地体现根系遭受沉陷或地裂缝等外力破坏时的受力状态。小叶锦鸡儿根系相比其他灌木(沙柳、沙棘等)具有更好的力学特性和固土效能[14-16]，说明该种植物在承受塌陷破坏时能够为土体提供更强大的支撑和保护作用。小叶锦鸡儿根系极限抗折强度与根径呈幂函数负相关，这一结论与诸多研究单根抗拉或抗剪特性的结果吻合[17-21]，也与本研究组试验所得结果一致[16,22]，其原因可能是构成根系细胞壁的骨架物质如纤维素微纤丝是进行拉力传导的主要物质，可以显著提高根系力学强度，其含量随根径的增大而减小[17]。植物根型包括直根和分叉根段，直根主要起到土体锚固作用，具有侧根分支结构的分叉根段能够对土体产生牵引效应[23]。前期研究发现，小叶锦鸡儿、沙柳等灌木侧根分支处抗拉力明显小于直根[24]。本试验同样证实，小叶锦鸡儿侧根分支处抗折强度显著低于直根。野外试验发现，侧根分支节点处受力后极易产生撕裂，裂隙会延上级直根发展，导致整条根系被破坏，成为整个根系网络的薄弱点和易损部位，在一定程度上决定了根－土复合体的稳定性。

根系受折损伤自修复主要为两个方面，一是生物学特性受损自修复，根系活性能够反映根系组织和细胞的活力程度[25]，根系保存率体现了自修复对根系数量的影响，根系分布越密集，根数越多，植物固持土体、维持坡面稳定的能力就越强[26]。研究表明，小叶锦鸡儿根系受损后活性、生长量和保存率均有不同程度降低，通过 3 个月的修复后不能完全恢复到平行对照水平，这与于瑞雪等对沙蒿生长量自修复的结果相似[27]。其中，直根活性、生长量、保存率的修复性显著大于侧根分支处，这可能是由于两种根型解剖结构中韧皮部和木质部占比不同导致的，韧皮部决定了根系的拉伸延长率，而木质部显著影响根系的机械强度[28]。细根的修复性也优于粗根。这是因为植物根系生长发育早期细胞和组织新陈代谢旺盛，是整个生长期活力最强的阶段，随着生长期的推进，根径增长的同时，组织细胞的活力会逐渐减弱[29]。二是抗折力学特性受损自修复，决定了根系对土体的可持续固持作用。当外力荷载超过根系弹性极限后会产生塑性变形[30-31]，显著抑制根系极限抗折力的增加。试验表明，小叶锦鸡儿根径 1～4 mm 根系在受损自修复 3 个月后，极限抗折力的平均修复率为 48.91%，说明外力损伤并不会让根系彻底失去固土能力，当外力破坏在可承受范围内，细胞仍然具有恢复损伤并存活下去的能力，根系的应力处理机制将被激活，开始细胞组织修复过程和形态学上的缓慢适应[32]，较强的愈伤能力可以促进细胞增生、分化，并对受损部位的结构和功能进行缓慢修复[33]，自修复后根系可以逐渐恢复生长速率和固土作用。根系生物学特性自修复与抗折力学特性自修复变化规律一致，表明生物学特性是影响根系抗折力学特性自修复的重要因素，受损自修复后根系活性、根径生长量和保存率越大，抗折力自修复程度越高，直接体现为直根抗折力修复率显著大于侧根分支处，细根修复率显著大于粗根。修复时长是另一个影响根系抗折力学特性自修复的重要因素，也是体现植物可持续固土能力的重要指标。试验表明，小叶锦鸡儿极限抗折力在短时期(3 个月)自修复后仍然远低于未受损水平，本课题组对沙柳直根不同修复时长下力学特性自修复的研究表明，抗拉力自修复 5 个月后修复率显著高于 3 个月；于瑞雪对沙蒿根系自修复的研究说明，修复 1 年后沙蒿根系可以完全消除外力损伤对生长造成的抑制作用[27]，这充分说明自然界的侵蚀破坏对根系造成的损伤可通过自修复机制逐步恢复，只不过需要一定的修复时间。本课题组初步研究认为，不同植物在相同修复时长内修复率必然存在差异，达到同样修复程度所需时间也大不相同，自修复能力强的植物受损后在较短时间即可恢复生长特性和材料力学特性的良性增长，持续发挥根系固土抗蚀作用；而自修复能力弱的植物受损后的恢复则是一个较为漫长的过程，在此期间其有效固土能力会大打折扣。因此，深入开展不同植物种受损自修复能力的研究，筛选具有优良可持续固土能力的水保植物，可以科学促进侵蚀频发矿区的生态恢复进程。

4 结 论

(1) 生长季初期小叶锦鸡儿 1～4 mm 径级范围内未受损直根平均极限抗折力为(86.64 ±

17.36)~(312.46 ±31.92)N,侧根分支处为(69.75 ±16.14)~(214.43 ±19.15)N;直根极限抗折强度为(47.81 ±4.09)~(33.42 ±2.39)MPa,侧根分支处为(31.49 ±7.73)~(23.17 ±2.85)MPa;两种根型极限抗折力均与根径呈幂函数正相关,抗折强度与根径幂函数负相关;直根极限抗折力和抗折强度均显著大于侧根分支处,后者是根系网络的易损部位。

(2)折力损伤自修复3个月后,小叶锦鸡儿根系活性、根径生长量和保存率均低于平行对照,其中根系活性平均减少11.87%、根径生长量降低36.47%、保存率减小16.83%;直根无论是平行对照或是受损自修复后3个生物学指标均比侧根分支处高。

(3)折力损伤自修复3个月后,小叶锦鸡儿根系极限抗折力和抗折强度相比生长季初期均有所增加,极限抗折力平均增加22.73%,极限抗折强度平均增加17.27%,但增长率均显著低于平行对照,表明根系受损后会显著抑制固土能力的增长,自修复特性在一定程度上可以逐步消除这种抑制作用,3个月后极限抗折力修复率为48.91%;抗折强度修复率为57.59%;受损自修复后直根极限抗折力和抗折强度的增长率及修复率均显著大于侧根分支处,具有更好的自修复能力;根系良好的生物学特性可以促进极限抗折强度的自修复。

参考文献(References):

〔1〕 封建民,董桂芳,郭玲霞,等.榆神府矿区景观格局演变及其生态响应[J].干旱区研究,2014,31(6):1 141 - 1 146.[Feng Jianmin,Dong Guifang,Guo Lingxia,et al. Ecological responses to changing landscape patterns in Yushenfu mining area[J]. Arid Zone Research,2014,31(6):1 141 - 1 146.]

〔2〕 胡振琪,王新静,贺安民.风积沙区采煤沉陷地裂缝分布特征与发生发育规律[J].煤炭学报,2014,39(1):11 - 18.[Hu Zhenqi,Wang Xinjing,He Anming. Distribution characteristic and development rules of ground fissures due to coal mining in windy and sandy region[J]. Journal of China Coal Society,2014,39(1):11 - 18.]

〔3〕 王双明,杜华栋,王生全.神木北部采煤塌陷区土壤与植被损害过程及机理分析[J].煤炭学报,2017,42(1):17 - 26.[Wang Shuangming,Du Huadong,Wang Shengquan. Analysis of damage process and mechanism for plant community and soil properties at northern Shenmu subsidence mining area[J]. Journal of China Coal Society,2017,42(1):17 - 26.]

〔4〕 胡婵娟,刘国华,郭雷,等.土壤侵蚀对土壤理化性质及土壤微生物的影响[J].干旱区研究,2014,31(4):702 - 708.[Hu Chanjuan,Liu Guohua,Guo Lei,et al. Effects of soil erosion on soil physicochemical properties and soil microorganisms[J]. Arid Zone Research,2014,31(4):702 - 708.]

〔5〕 郭京衡,李尝君,曾凡江,等.2种荒漠植物根系生物量分布与土壤水分、养分的关系[J].干旱区研究,2016,33(1):166 - 171.[Guo Jingheng,Li Changjun,Zeng Fanjiang,et al. Relationship between root biomass distribution and soil moisture,nutrient for two desert plant species[J]. Arid Zone Research,2016,33(1):166 - 171.]

〔6〕 郭月峰,王娟,祁伟,等.风沙土区黄柳根系及其碳储量分布特征[J].干旱区研究,2017,34(2):344 - 349.[Guo Yuefeng,Wang Juan,Qi Wei,et al. Distribution of roots and root carbon stocks of *Salix gordejevii* in Aohan Banner,Inner Mongolia[J]. Arid Zone Research,2017,34(2):344 - 349.]

〔7〕 潘东江,张农,赵一鸣,等.西部矿区植被根系采动损伤特征及细观力学机制[J].煤炭学报,2017,42(2):373 - 380.[Pan Dongjiang,Zhang Nong,Zhao Yiming,et al. Characteristics and mesoscopic mechanics of vegetation roots damage induced by mining in western mining area[J]. Journal of China Coal Society,2017,42(2):373 - 380.]

〔8〕 蒙仲举,任晓萌,陈晓燕,等.采煤塌陷对沙柳根系损伤机理研究[J].北方园艺,2014(1):66 - 68.[Meng Zhongju,Ren Xiaomeng,Chen Xiaoyan,et al. Study on damage mechanism of roots of *Salix psammophila* by mining subsidence[J]. Northern Horticulture,2014(1):66 - 68.]

〔9〕 王东生.论水土流失综合治理中植被自然修复的可行性[J].中国水土保持,2013(3):51 - 54.[Wang Dongsheng. Feasibility of natural rehabilitation of vegetation in integrated treatment of soil and water loss[J]. Soil and Water Conservation in China,2013(3):51 - 54.]

〔10〕 张涛,陈智平,车克钧,等.干旱区矿区不同立地类型土壤种子库特征[J].干旱区研究,2017,34(1):51 - 58.[Zhang Tao,Chen Zhiping,Che Kejun,et al. Characteristics of soil seed banks of different site types in arid mining area[J]. Arid Zone Research,2017,34(1):51 - 58.]

〔11〕 胡振琪,龙精华,王新静.论煤矿区生态环境的自修复、自然修复和人工修复[J].煤炭学报,2014,39(8):1 751 - 1 757.[Hu Zhenqi,Long Jinghua,Wang Xinjing. Self-healing natural restoration and artificial restoration of ecological environment for coalmining[J]. Journal of China Coal Society,2014,39(8):1 751 - 1 757.]

〔12〕 毕银丽,王瑾,冯颜博,等.菌根对干旱区采煤沉陷地紫穗槐根系修复的影响[J].煤炭学报,2014,39(8):1 758 - 1 764.[Bi Yinli,Wang Jin,Feng Yanbo,et al. Effect of arbuscular mycorrhiza on root self-repairing action of *Amorpha fruticosa* L. in coal mining subsidence land in arid areas[J]. Journal of China Coal Society,2014,39(8):1 758 - 1 764.]

〔13〕 杜涛,毕银丽,邹慧,等.地表裂缝对沙柳根际微生物和酶活性的影响[J].煤炭学报,2013,38(12):2 221 - 2 226.[Du Tao,Bi Yinli,Zou Hui,et al. Effects of surface cracks caused by coal

mining on microorganisms and enzyme activities in rhizosphere of *Salix psammophila*〔J〕. Journal of China Coal Society,2013,38(12):2 221 – 2 226.〕

〔14〕 Yuan S,Zhang X,Liu J,et al. Study of the influence factors on roots tensile strength of *Caragana microphylla* Lam. and *Sabina vulgaris* Ant.〔C〕//International Conference on Combating Land Degradation in Agricultral Areas,2010:526 – 529.

〔15〕 Liu F Q,Liu J,Liu P F,et al. Benefit evaluation of soil-reinforcement by roots between five plants by analytic hierarchy process〔J〕. Advanced Materials Research,2014,955:3 514 – 3 517.

〔16〕 赵玉娇,胡夏嵩,李华坦,等. 寒旱环境灌木根系增强边坡土体抗剪强度特征〔J〕. 农业工程学报,2016,32(11):174 – 180.〔Zhao Yujiao, Hu Xiasong, Li Huatan, et al. Characteristics of slope soil shear strength reinforced by shrub roots in cold and arid environments〔J〕. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2016,32(11):174 – 180.〕

〔17〕 Li Y F,Liu J,Zhang X,et al. Study on the vulnerable root location of two kinds of plants by anti-fracture force〔C〕//New Energy and Sustainable Development: Proceedings of 2016 International Conference on New Energy and Sustainable Development (NESD 2016),2017:271 – 277.

〔18〕 Zhang C B,Chen L H,Jiang J. Why fine tree roots are stronger than thicker roots: The role of cellulose and lignin in relation to slope stability〔J〕. Geomorphology,2014,206:196 – 202.

〔19〕 Bordoni M,Meisina C,Vercesi A,et al. Quantifying the contribution of grapevine roots to soil mechanical reinforcement in an area susceptible to shallow landslides〔J〕. Soil & Tillage Research,2016,163:195 – 206.

〔20〕 Maeeo T. Root tensile strength relationships and their slope stability implications of three shrub secies in the Northoern Apennines (Italy)〔J〕. Geomorphology,2007,87(4):268 – 283.

〔21〕 王云翔,孙海龙,罗龙皂,等. 人工石质边坡构树根系抗剪特性研究〔J〕. 水土保持研究,2012,19(3):114 – 118.〔Wang Yunxiang,Sun Hailong,Luo Longzao,et al. Study on characteristic of root shear of *Broussonetia papyrifera* L. on rocky-steep slope〔J〕. Research of Soil and Water Conservation,2012,19(3):114 – 118.〕

〔22〕 Yao X J,Wang L H,Liu J,et al. Biomechanics and utility of shallow soil fixation by *Sabina valgaris* Ant. roots in arid and semiarid soils〔J〕. Sensors & Transducers Journal,2014,167(3):129 – 134.

〔23〕 Giadrossich F,Schwarz M,Cohen D,et al. Mechanical interactions between neighbouring roots during pullout tests〔J〕. Plant and Soil,2013,367(1 – 2):391 – 406.

〔24〕 Liu X M,Liu J,Sun X,et al. Study on the lateral root branch tensile mechanical characteristics of three kinds of plants at exuberant growth period〔J〕. Agriculture and Animal Science,2012,47:47 – 51.

〔25〕 王姣龙,李际平,谌小勇,等. 芘胁迫下紫玉兰根系活性及根系分泌物的响应〔J〕. 中南林业科技大学学报,2017,37(2):50 – 56.〔Wang Jiaolong,Li Jiping,Chen Xiaoyong,et al. Response of polycyclic aromatic hydrocarbon pyrene on root exudate components and root activity of *Magnolia liliiflor* Desr.〔J〕. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2017,37(2):50 – 56.〕

〔26〕 Saifuddin M,Osman N,Motior R M,et al. Soil reinforcement capability of two legume species from plant morphological traits and mechanical properties〔J〕. Current Science,2015,108(7):1 340 – 1 347.

〔27〕 于瑞雪,李少朋,毕银丽,等. 煤炭开采对沙蒿根系生长的影响及其自修复能力〔J〕. 煤炭科学技术,2014,42(2):110 – 113.〔Yu Ruixue,Li Shaopeng,Bi Yinli,et al. Effect of coal mining on root growth of *Artemisia sphaerocephala* and its self-repairing ability〔J〕. Coal Science and Technology,2014,42(2):110 – 113.〕

〔28〕 朱海丽,胡夏嵩,毛小青,等. 护坡植物根系力学特性与其解剖结构关系〔J〕. 农业工程学报,2009,25(5):40 – 46.〔Zhu Haili,Hu Xiasong,Mao Xiaoqing,et al. Relationship between mechanical characteristics and anatomical structures of slope protection plant root〔J〕. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2009,25(5):40 – 46.〕

〔29〕 陆秀明,黄庆,刘怀珍,等. 华南超级稻根系特点和根系活力研究〔J〕. 中国农学通报,2012,28(6):30 – 34.〔Lu Xiuming,Huang Qing,Liu Huaizhen,et al. Research of root characteristics and root activity in south super-yield rice〔J〕. Chinese Agricultural Science Bulletin,2012,28(6):30 – 34.〕

〔30〕 Makarova O V,Cofie P,Koolen A J. Axial stress-strain relationships of fine roots of Beech and Larch in loading to failure and in cyclic loading〔J〕. Soil & Tillage Research,1998,45(1 – 2):175 – 187.

〔31〕 Cofir P,Koolen A J. Test speed and other factors affecting the measurement of tree root properties used in soil reinforcement models〔J〕. Soil & Tillage Research,2001,63(1 – 2):51 – 56.

〔32〕 阳小成. 环境应力对中华猕猴桃组织培养过程生物学效应的初步研究〔D〕. 重庆:重庆大学,2002.〔Yang Xiaocheng. Primary Study on Biological Effects of *Actinidia chinensis* Callus & Seedling on Environmental Stresses〔D〕. Chongqing: Chongqing University,2002.〕

〔33〕 孙贝贝,刘杰,葛亚超,等. 植物再生的研究进展〔J〕. 科学通报,2016,61(36):3 887 – 3 902.〔Sun Beibei,Liu Jie,Ge Yachao,et al. Recent progress on plant regeneration〔J〕. Chinese Science Bulletin,2016,61(36):3 887 – 3 902.〕

Effects of Self-healing of *Caragana microphylla* on Root Soil Reinforcement in Arid Diggings

WANG Bo[1], LIU Jing[1], WANG Chen-jia[1], ZHANG Xin[2], LI Qiang[3], LIU Jia-wei[1], ZHANG Qiang[1]

(1. *College of Desert Control Science and Engineering*, *Inner Mongolia Agricultural University*, *Hohhot* 010019, *Inner Mongolia*, *China*;

2. *Institute of Water Resources for Pasturing Area*, *Ministry of Water Resources*, *Hohhot* 010019, *Inner Mongolia*, *China*;

3. *Environmental Management Office*, *Shendong Coal Group*, *Ejin Horo Banner* 017200, *Inner Mongolia*, *China*)

Abstract: In this study, the HG100 digital push & pull tester and self-developed experimental installation were used to investigate the anti-fracture mechanical properties of tap roots (diameter was 1 – 4 mm) and lateral roots of *Caragana microphylla* before and after occurring the fracture force injury. The purposes of the study were to clarify the effects of fracture force injury on mechanical properties and self-healing mechanism of plant roots after soil erosion occurred in the Shendong diggings. The results indicated that: ① There was a positive power function correlation between the root ultimate anti-fracture force and root diameter of *C. microphylla* in early growth season, but a negative one between the anti-fracture strength and root diameter. Moreover, the ultimate anti-fracture force and strength of tap roots were higher than that of lateral roots. ② The fracture force injury restricted significantly the normal growth of roots, and the activity, growth and survival rate of *C. microphylla* roots after self-healing were all lower than those of contrast. Root diameter and root type were the important factors affecting evidently such restriction, the activity and survival rate of lateral roots were decreased more significantly than those of tap roots after injured; ③ The ultimate anti-fracture force and strength of *C. microphylla* roots were increased to some extent after self-healing compared with those in early growth season, but such increase was restricted by the external injury, and the growth rate was significantly lower than that of control. The self-healing rates of ultimate anti-fracture force and strength after three months were 48.91% and 57.59% respectively. In conclusion, the root system could not completely lose its soil reinforcement capability after injured, the original function could be restored gradually through self-healing capability. The self-healing rates of tap roots and lateral roots were 60.55% and 36.34% respectively, which showed that the self-healing capability of tap roots was obviously higher than that of lateral roots.

Key words: coal mining subsidence land; anti-fracture feature; *Caragana microphylla*; root injured; self-healing